

- [25] Lant, T. – Robinson, D. L. – Spafford, B. – Storesund, J.: Review of weld repair procedures for low alloy steels designed to minimise the risk of future cracking. In: 2nd HIDA Conference, Stuttgart, 2000
- [26] Wortel van H.: State of the art of repair welding in the Netherlands. IIW WG Creep. State of the art of repairs of creep damaged components. May 31, 1994
- [27] Lundin, C. D. et al.: The efficiency of the utilization of low carbon Cr-Mo weld metal for repairs in Cr-Mo vessels and piping. Submitted to The Committee on Welds Materials Division Pressure Vessel Research Council. January 1994
- [28] Wu, R. – Storesund, J. – Sandstrom, R. – von Walden, E.: Influence of post weld heat treatment on creep properties of 1Cr0.5Mo welded joints. Mat. at High Temperatures, Vol. 12, 1993, č. 4, s. 269 – 276
- [29] Rotvel, F. – Sampietri, C. – Verelst, L. – Wortel van, H. – Zhi, L. Y.: Header integrity assessment. In: Proc. of Baltica IV conf. on Plant Maintenance for Managing Life and Performance. VTT symposium 184, Edited by Hietanen, S. & Auerkari, 1998, s. 201 – 212

Vplyv ochranného plynu a tvaru hrotu volfrámovej elektródy na geometriu zvarových spojov austenitických ocelí

Influence of shielding gas and tungsten electrode tip profile on the weld geometry of austenitic steels

GÁBOR VÁGVÖLGYI – JÁNOS DOBRÁNSZKY – LÁSZLÓ GYURA – LÁSZLÓ REICHARDT

Výsledky výskumu vplyvu dvoch parametrov na tvar závaru pri zváraní volfrámovou elektródou v ochrane inertného plynu • Skúmané vstupné parametre: zloženie ochranného plynu s prímiesou vodíka a hélia a uhol hrotu volfrámovej elektródy, konkrétne 15°; 22,5°; 30°; 45°; 90° a 180° • Účinok čistého argónu a prímies 2 %; 5 %; 6,5 % vodíka, resp. 50 % hélia • Významné zväčšenie hĺbky závaru prímiesou vodíka, ako aj hélia • Použitie zmesi plynov – vhodný prostriedok na zhotovenie jednostranných zvarov s plným závarom neprístupných z dvoch strán • Zväčšenie šírky závaru prímiesou hélia • Výrazné zväčšenie hĺbky závaru, už pri objemovom množstve vodíka 2 % • Materiál elektródy WL15 legovaný oxidom lantánu, priemer 2,4 mm • Skúšky naváraním húsenice na austenitickú oceľ AISI 304L • Vyhodnocovanie tvaru návaru pomocou digitálnych fotografií metalografických výbrusov a stanovenie šírky, hĺbky a prierezu závaru • Výskum spoločne pôsobiacich parametrov

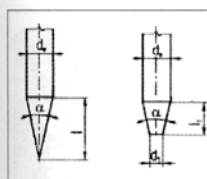
Research results of the effect of two parameters on the shape of weld penetration in TIG welding were outlined. The input parameters: chemical composition of shielding gas with hydrogen and helium admixture and tungsten electrode angle of cone namely 15°; 22.5°; 30°; 45°; 90° and 180°, the effect of pure argon and 2 %; 5 %; 6.5 % hydrogen or 50 % helium admixtures, significant penetration depth increase by hydrogen as well as helium admixture, use of gas mixtures – suitable means for fabrication of single-sided welds with full penetration inaccessible from both sides, increase of penetration width by helium admixture as well as expressive penetration depth increase already at 2 % hydrogen voluminous content and WL 15 electrode material alloyed by lanthanum oxide 2.4 mm in diameter were studied. The tests of bead deposition on AISI 304L austenitic steel were carried out. The weld overlay shape was evaluated by digital photographs of etched metallographic specimens and the penetration width, depth and cross-section were assessed. The interacting parameters were studied.

V inžinierskej praxi sa stále častejšie stretávame so základnými materiálmi austenitickej štruktúry. Austenitické ocele sa používajú od začiatku XX. storočia a ich používanie stále rastie. V r. 2003 svetová produkcia ocele bola 900 miliónov ton, z toho 20 miliónov ton austenitickej ocele (2,22 %). Pri spracovaní austenitických ocelí má osobitný význam oblúkové zváranie volfrámovou elektródou v ochrane inertného plynu – TIG. Pri TIG zváraní majú veľký význam vlastnosti ochranných plynov a volfrámových elektród.

G. Vágvölgyi, Kasamas Hungária Hegesztéstechnológiai Kft., Szekszárd – J. Dobránszky, MTA – BME Fémtechnológiai Kutatócsoport, Budapest, L. Gyura – L. Reichardt, Linde Gáz Magyarország Rt., Budapest, Maďarsko / Hungary

Veľké podniky, ktoré tradične spracovávajú austenitické ocele, používajú ako ochranný plyn nielen Ar, ale aj iný plyn alebo zmes plynov. Často nepoužívajú iný plyn ani na ochranu koreňa. Hlavnou príčinou tohto stavu môže byť, že nie sú prístupné vhodné informácie, príručky alebo učebnice, ktoré by uvádzali odporúčané parametre zvárania pre iné plyny. Použitie iných ochranných plynov vyžaduje teda od zvaracích inžinierov ochotu experimentovať, k čomu sú potrebné vhodné podmienky.

Podobné problémy sa vyskytujú pri výbere typu volfrámovej elektródy a tvaru hrotu elektródy. Aj tu chýbajú vhodné informácie a zväčša ich možno nájsť len v cudzojazyčnej literatúre. Výber elektródy sa robí podľa zvyklostí a nie s uvážením podmienok použitia.



d_e (mm)	l (mm)	d_1 (mm)	l_1 (mm)
1,0	2,5	0,5	1,2
1,6	4,0	0,8	2,0
2,4	6,0	1,2	3,0
3,2	8,0	1,6	4,0
4,0	10,0	2,0	5,0

Obr. 1. Odporúčané rozmery a otupenie hrotov W elektród (v oboch prípadoch $\alpha = 30^\circ$ až 35°)

Fig. 1. Recommended dimensions and tapering of W electrode tips (in both cases $\alpha = 30^\circ$ up to 35°)

V článku sa posudzuje vplyv spomenutých parametrov s cieľom pomôcť odborníkom v každodennej praxi.

Oblúkové zváranie austenitických ocelí volfrámovou elektródou v inertnom plyne

Oblúkové zváranie volfrámovou elektródou v ochrane argónu Ar bolo objavené v r. 1936 a rozšírilo sa po II. svetovej vojne (na označenie spôsobu zvárania sa používa viacero skratiek, podľa STN EN 24063 je to TIG zváranie). Dnes pod týmto označením rozumieme aj zváranie v ochrane iných inertných plynov [1]. Na zapálenie oblúka používajú náročnejší výrobcovia výlučne vysokofrekvenčné zapalovacie zariadenie [2]. Zariadenie je pripojené paralelne k okruhu zváracieho prúdu a napája elektródu vysokofrekvenčným vysokým napätím. Napätie 2 až 5 kV, bez ohľadu na druh ochranného plynu, je dostatočné na to, aby spôsobilo elektrický výboj na vzdialenosť až 50 mm. Výboj ionizuje prostredie a vytvára podmienky na vznik zváracieho oblúka [3].

Zváranie TIG (141) v porovnaní s ručným oblúkovým zváraním (111) a zváraním MIG (131) je pomalšie a drahšie. Príčinou je vysoká koncentrácia zdroja tepla, vyššia cena ochranných plynov a mzdové náklady zaškolených zvaračov. Konkurencieschopnosť TIG spôsobu zvárania vyplýva z kvality zvarov (zvary vyžadujú minimálnu povrchovú úpravu), širokého rozsahu zvariteľných hrúbok a druhov materiálov. Osobitné problémy zvárania austenitických ocelí sú tieto [4 až 8]:

- Hrozí nebezpečenstvo vzniku veľkých tepelných deformácií, zvyškových napätí a kryštalizačných trhlín

v dôsledku malej koncentrácie tepelného príkonu a zlej tepelnej vodivosti austenitického materiálu. Preto treba zmenšiť tepelný príkon, čo môže viesť k použitiu viacvrstvových zvarov a nutnosti použitia zvarových úkosov aj pri tenkých plechoch.

- Nižší tepelný príkon spôsobí pomalšie chladnutie, čím sa zvyšuje nebezpečenstvo vzniku škodlivých štruktúrnych fáz.
- Pre zváranie vysokolegovaných ocelí je charakteristické, že povrchové napätia možno ovplyvniť len s obsahom kremika Si.
- Na zabránenie nežiadúcej oxidácii povrchu a vyhorenia legúr treba chrániť zvar nielen zo strany oblúka, ale aj koreňovú oblasť zvaru.
- Osobitnú pozornosť treba venovať materiálom nástrojov a prípravkov použitých pri spracovávaní austenitických ocelí (napr. drôtenými kefami, rezacím kotúčom atď.). Podľa možnosti treba oddeliť časť dielne, kde sa spracovávajú austenitické ocele. Časti dopravných a skladovacích zariadení treba zakryť drevom, plastom alebo plechom z austenitickej ocele. Treba zabrániť každému styku dvoch druhov kovov.
- Dlhší čas zvárania predlžuje aj čas pôsobenia dymov a splodín na zvarača.

Materiály volfrámových elektród

Pri TIG zváraní horí oblúk medzi výrobkom a volfrámovou elektródou, ktorá má dve úlohy: privádzať prúd a koncentrovať a smerovať stĺpec oblúka na miesto zvárania. Materiálom elektródy býva čistý volfrám alebo volfrám legovaný oxidom kovov. Nakoľko volfrámové elektródy sa zhotovujú sintrovaním, primiešanie potrebných oxidov kovov nepredstavuje väčší problém. Prehľad bežných typov elektród je v tab. 1.

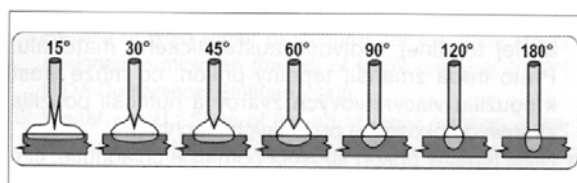
Legovanie je potrebné z dvoch dôvodov:

- oxidy prvkov vzácnych zemin zvyšujú prúdovú a tepelnú zatažiteľnosť elektród (bod tavenia čistého W je 3410°C , žhaviaca teplota elektród legovaných La sa blíži k 4200°C),
 - oxidy znižujú výstupnú energiu emisie elektrónov.
- V dôsledku toho sa významne zlepši zapalovanie

Tab. 1. Charakteristické údaje volfrámových zvaracích elektród

Tab. 1. Characteristic data about tungsten welding electrodes

Označenie / Designation	Typ a množstvo oxidu (%) / Type and amount of oxide (%)	Farebné označenie / Colour designation	Druh prúdu / Current type	Norma / Standard
WP	–	zelené / green	AC	EN 26848
WT4	0,35 – 0,55 ThO ₂	tmavomodré / dark blue	DC	EN 26848
WT10	0,90 – 1,20 ThO ₂	žlté / yellow	DC	EN 26848
WT20	1,80 – 2,20 ThO ₂	červené / red	DC	EN 26848
WT30	2,80 – 3,20 ThO ₂	fialové / violet	DC	EN 26848
WT40	3,80 – 4,20 ThO ₂	pomarančové / orange	DC	EN 26848
WZ3	0,15 – 0,50 ZrO ₂	hnedé / brown	AC	EN 26848
WZ8	0,70 – 0,90 ZrO ₂	biele / white	AC	EN 26848
WC20	1,80 – 2,20 CeO ₂	sivé / grey	DC	EN 26848
WL10	0,90 – 1,20 LaO ₂	čierné / black	AC / DC	EN 26848
WL15	1,30 – 1,70 LaO ₂	zlaté / golden	AC / DC	AWS A5.12
WL20	1,80 – 2,20 La ₂ O ₃	svetlomodré / light blue	AC / DC	ISO 6848
WS2	zmes oxidov / mixture of oxides	tyrkysové / turquoise	AC / DC	–
WY20	1,80 – 2,20 YO ₂	modré / blue	AC / DC	ISO 6848
WX	1,00 – 4,00 % zmes oxidov / mixture of oxides	žltozelené / yellow-green	AC / DC	AWS A5.12



Obr. 2. Vplyv uhla α hrotu W elektródy na tvar oblúka a na tvar závaru pri zváraní spôsobom „mikro – TIG“ [10]

Fig. 2. Effect of angle α of W electrode tip on arc shape and penetration shape in micro-TIG welding [10]

a stabilita oblúka. Volfrámové elektródy rôzneho chemického zloženia majú rozdielne vlastnosti z hľadiska zvarovania [9].

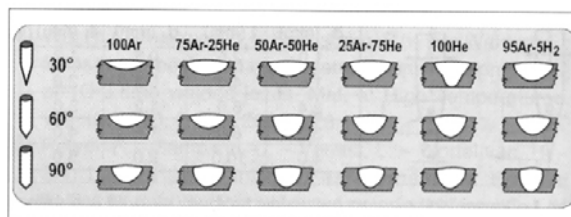
Nelegované W elektródy majú nízku žhaviacu teplotu (~ 3400 °C) a používajú sa prednostne na zváranie Al; Mg a ich zliatin.

W elektródy legované oxidom tória Th boli najviac používané elektródy na zváranie nízko a vysokolegovaných ocelí, medi, titánu a ďalších kovov. Používa sa pri nich jednosmerný prúd. Ich prúdová zatažiteľnosť je asi o 20 % väčšia ako čistých nelegovaných W elektród, majú vyššiu odolnosť proti opotrebeniu. Žhaviaca (pracovná) teplota je asi 4000 °C. Pre rádioaktívne vlastnosti tória sa tieto elektródy nemohli používať na zváranie v jadrovej energetike, dnes pre škodlivý vplyv na zdravie je použitie Th zakázané.

W elektródy legované oxidom zirkónia sa používajú najmä pri zváraní striedavým prúdom, ale možno ich použiť aj pri zváraní jednosmerným prúdom. Pri zváraní ľahkých kovov sú odolnejšie proti opotrebeniu ako nelegované W elektródy. Vyznačujú sa dobrým zapáľovaním oblúka. Žhaviaca teplota je ~ 3800 °C.

W elektródy legované oxidom céru sa používajú pri zváraní jednosmerným prúdom nízkej intenzity.

W elektródy legované oxidom lantánu majú vynikajúce vlastnosti, podobne ako pri legovaní tóriom, ale



Obr. 3. Vplyv obsahu argónu Ar, hélia He a vodíka H₂ (%) pri rôznom uhle α hrotu W elektródy na geometrické charakteristiky závaru/húsenice

Fig. 3. Effect of argon Ar, helium He and hydrogen H₂ content (%) at different angle α of W electrode tip on geometry characteristics of penetration/bead

možno ich použiť aj pri zváraní striedavým prúdom. Majú dlhú životnosť a lantán nie je rádioaktívny, ani zdraviu škodlivý. Očakáva sa, že v blízkej budúcnosti nahradí dnes najrozšírenejšie elektródy. Žhaviaca teplota je ~ 4200 °C.

Tvar hrotu volfrámových elektród

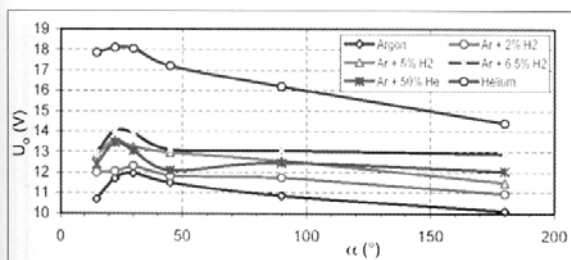
Treba zdôrazniť, že tvar hrotu W elektród významne vplyva na tvar oblúka a tým na šírku, hĺbku a tvar závaru. Pri zváraní jednosmerným prúdom uhol hrotu elektródy je funkciou intenzity prúdu, napr. podľa odporúčania firmy Trafimet je pre prúd $I = 5$ až 10 A vhodný uhol $\alpha = 20^\circ$; pre $I = 10$ až 20 A $\rightarrow \alpha = 30^\circ$; pre $I = 20$ až 100 A $\rightarrow \alpha = 60^\circ$ až 90° ; pre $I = 100$ až 200 A $\rightarrow \alpha = 90^\circ$ až 120° . Koniec hrotu elektródy treba otupiť. Tým zabránime prúdovému preťaženiu hrotu, jeho odtaveniu a vzniku volfrámových vtrúsení vo zvarovom kove. Odporúčané rozmery hrotov a otupenia pre rôzne priemery W elektród sú na obr. 1.

V odbornej literatúre sú protichodné údaje o vplyve uhlu hrotu elektródy na tvar húsenice. Podľa niektorých prameňov [3] pri zmenšovaní uhlu hrotu sa zväčší hĺbka závaru a zmenší sa šírka húsenice, iní predpokladajú

Tab. 2. Ochranné a formovacie plyny firmy Linde na TIG zváranie

Tab. 2. Shielding and forming gases for TIG welding from Linde Co.

Názov plynu / Type of gas	Označenie podľa DIN 439 / Designation according to DIN 439	Chemické zloženie (%) / Chemical composition (%)				
		Ar	O ₂	He	N ₂	H ₂
Na zváranie / For welding						
Argón / Argon	I 1	100				
Hélium / Helium	I 2			100		
Varigon S	M 13	zbytok / residue	0,03			
Varigon He 30	I 3	70		30		
Varigon He 50	I 3	50		50		
Varigon He 70	I 3	30		70		
Varigon He 30 S	M 13 (1)	zbytok / residue	0,03	30		
Varigon H 2	R 1	98				2
Varigon H 5	R 1	95				5
Varigon H 6	R 1	93,5				6,5
Varigon H 10	R 1	90				10
Varigon H 15	R 1	85				15
Varigon H 20	R 2	80				20
Na ochranu koreňa zvaru / For root protection						
Dusík N ₂ / Nitrogen	F 1				100	
Formovací plyn 95/5 / Forming gas 95/5	F 2				95	5
Formovací plyn 90/10 / Forming gas 90/10	F 2				90	10
Formovací plyn 85/15 / Forming gas 85/15	F 2				85	15
Formovací plyn 80/20 / Forming gas 80/20	F 2				80	20



Obr. 4. Vplyv veľkosti uhla α hrotu W elektródy a druhu ochranného plynu na napätie oblúka U_0 .

Fig. 4. Effect of size of angle α of W electrode tip and type of shielding gas on arc voltage U_0 .

opačný účinok, tak ako je znázornené na obr. 2 [10].

Pritom literatúra neuvádza potrebné údaje o skúškach, ako veľkosť zväracieho prúdu a vlastnosti ochranného plynu. Naopak, jednoznačná je zhoda údajov o vplyve akosti povrchu W elektród: čím je menšia drsnosť povrchu brúsených častí hrotu, tým je dlhšia životnosť elektród. Priaznivý vplyv má aj to, ak sú ryhy po brúsení v smere osi elektródy.

Priemer elektródy sa má vždy stanoviť v závislosti od druhu a intenzity prúdu a od legovania elektródy. Bolo by účelné aj tu zohľadniť vplyv ochranného plynu, ale takéto údaje sa nenašli. Pri veľmi malom priemere W elektródy je táto preťaženosť a rýchlejšie sa opotrebuje. Použitie elektródy väčšieho priemeru ako je potrebné nie je tiež účelné, nakoľko oblúk v dôsledku malého prúdového zaťaženia elektródy putuje na hrote elektródy a tým bráni tvorbe spoja dobrej kvality.

Putujúci oblúk môže vytvoriť miestne prúdové preťaženie elektródy, čím sa zvyšuje opotrebenie a môžu vzniknúť volfrámové vtrúseniny v zvarovom kove. Pri zváraní striedavým prúdom sa hrot elektródy opáli do poglobulovitého tvaru. Vzniklý oblúk sa rozptyľuje na poglobulovitom hrote a tak so striedavým prúdom nemožno zhotoviť spoj správneho tvaru a dobrej kvality.

Ochranné plyny na TIG zváranie

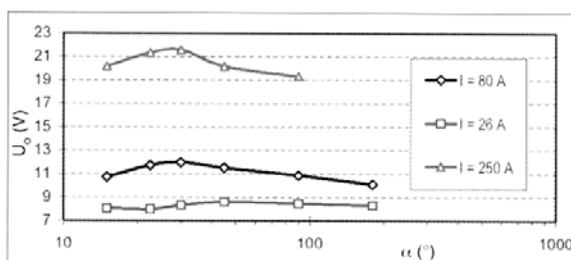
Pri TIG zváraní v ochrane inertného plynu má ochranný plyn štyri úlohy:

- chrániť W elektródu a roztavený zvarový kov od škodlivého vplyvu vzduchu,
- v dôsledku nízkeho ionizačného potenciálu napomáhať zapáleniu a znovuzapaľovaniu oblúka,
- zabezpečovať vytvorenie plazmy oblúka, ktorej tepelný obsah a tepelná vodivosť napomáha vytvoriť roztavený kov zo základného a prídavného materiálu,
- pri použití pištole s plynovým chladením chladiť W elektródu a vnútorné časti pištole.

Výber ochranného plynu z tých, ktoré sú na trhu, sa má robiť z hľadiska uvedených požiadaviek. Prehľad ochranných plynov, vrátane plynov na ochranu koreňa, od firmy Linde je v tab. 2.

Rôzne plyny, resp. zmesi plynov vplyvajú rozdielnym spôsobom na vlastnosti zväracieho oblúka a zvarového kovu spoja [11 – 18].

Argón je najrozšírenejší vzácny plyn na trhu. Má



Obr. 5. Vplyv uhla α hrotu W elektródy a intenzity prúdu na napätie oblúka U_0 .

Fig. 5. Effect of angle α of W electrode tip and current intensity on arc voltage U_0 .

veľmi nízky ionizačný potenciál (15,76 eV), preto je oblúk v atmosfére Ar stabilný a ľahko sa zapáľuje. Má však nízku vodivosť tepla. Vyrába sa postupným odparovaním vzduchu, čo je pomerne lacný postup. Na zváranie sa odporúča použiť Ar s čistotou min. 4.6.

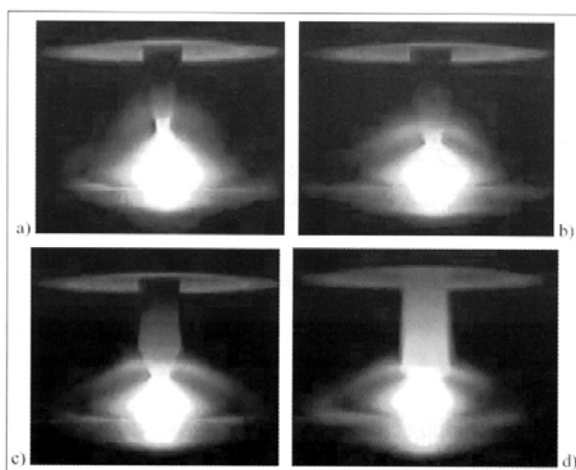
Hélium je pomerne drahý plyn, preto sa v Európe málo používa. Používa sa najmä na zváranie ľahkých kovov. Má vysoký ionizačný potenciál (24,59 eV), pre dobrú tepelnú vodivosť vytvára veľkú hustotu energie a väčší závar. V dôsledku toho na okrajoch zvarov zhotovených v atmosfére He vzniká hrubá oxidická vrstva. Má nižšiu hustotu, preto pri zváraní „do žliabku“ treba použiť väčší prietok plynu. Má zlý vplyv na zapáľovanie oblúka. Vplyv rôzneho obsahu He a H_2 na geometriu zvaru/závaru znázorňuje obr. 3.

Vodík H_2 je redukčný plyn, pridáva sa max. 20 % H_2 k argónu. Zvyšuje napätie oblúka a tepelnú vodivosť plynu, v dôsledku toho zväčšuje závar. Pri zváraní feritických ocelí zvyšuje náchylnosť na vznik vodíkom indukovaných trhlín. Austenitické ocele sú odolnejšie proti účinku H_2 a pre väčšiu deformovateľnosť dobre znášajú prítomnosť H_2 . Pri použití H_2 treba venovať pozornosť obsahu δ -feritu, ktorý spravidla neprevyšuje 10 %. Prítomnosť aj malého obsahu kyslíka O_2 môže spôsobiť tvorbu pórov.

Kyslík O_2 je aktívny plyn so silne oxidačným účinkom. Používa sa preto, že už aj malé množstvo O_2 znižuje povrchové napätie roztaveného kovu. Použitie O_2 pri TIG zváraní nie je charakteristické, lebo výrazne zvyšuje opotrebenie W elektród pri zhaviacej teplote v rozmedzí 3 400 až 4 200 °C. Výnimočne sa používa pri zváraní striedavým prúdom primiešaním niekoľko % O_2 do ochranného plynu.

Dusík N_2 sa spravidla používa na ochranu koreňa. Z hľadiska zvárania sa správa ako inertný plyn, ale pri rozpustení sa v oceli môže spôsobiť problémy. Obzvlášť sa to prejaví pri zváraní duplexných ocelí, kde obsah δ -feritu výrazne závisí od obsahu N_2 v ochrannom plyne, dusík N_2 je austenitotvorný prvok. Pri zváraní stabilizovaných austenitických ocelí môže nastať žlté-zlaté zafarbenie koreňovej časti, vznikom TiN.

Pre TIG zváranie sa používa v Maďarsku téměř výlučne argón Ar. Len podniky s väčším zväračským potenciálom používajú zmesi plynov a využívajú ich priaznivé účinky.



Obr. 6. Tvar oblúka v ochrannom plyne Ar pre rôzny uhol α hrotu W elektródy: a) $\alpha = 22,5^\circ$; b) $\alpha = 30^\circ$; c) $\alpha = 45^\circ$; d) $\alpha = 90^\circ$. Intenzita prúdu: $I = 80$ A, vzdialenosť hrotu elektródy $h = 2$ mm, priemer W elektródy $d = 2,4$ mm

Fig. 6. Arc shapes in Ar shielding gas for different angle α of W electrode tip a) $\alpha = 22,5^\circ$; b) $\alpha = 30^\circ$; c) $\alpha = 45^\circ$; d) $\alpha = 90^\circ$. Current intensity: $I = 80$ A, electrode tip distance $h = 2$ mm, W electrode diameter $d = 2,4$ mm

Údaje o experimentálnych prácach a skúškach

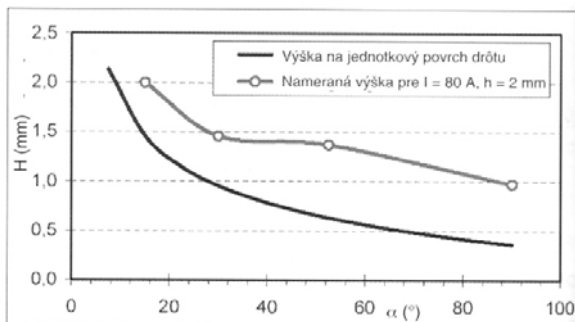
Experimenty sa zamerali na sledovanie vplyvu dvoch parametrov na geometriu zvaru: zloženie ochranného plynu a uhol hrotu W elektródy. Ostatné parametre zvarovania sa pri skúškach nemenili. Prehľad premenných parametrov je v tab. 3 a stálych parametrov je v tab. 4.

Hĺbka a šírka závaru na skúšobných vzorkách sa stanovovali na rezoch (makroštruktúre) pod mikroskopom. Pri stanovovaní hĺbky a šírky sa do plochy roztaveného kovu zahrnula plocha až po hranicu natavenia.

Vplyv tvaru hrotu W elektródy sa v literatúre hodnotí rôznym spôsobom a dá sa predpokladať, že je to dôsledok rozdielnej veľkosti prúdu použitého pri experimentoch rôznymi autormi. Preto pri základnej sérii skúšok s Ar okrem štandardného prúdu 80 A sa použil aj vyšší prúd 250 A a podstatne nižší prúd 26 A. Samozrejme pôvodne stále – konštantné parametre sa museli prispôbiť zmeneným zvaracím prúdom, aby sa vyhotovil hodnotiteľný závar. Cieľom týchto sérii skúšok nebolo, aby získané údaje boli porovnateľné s výsledkami základného výskumu. Napriek tomu umožňujú vytvoriť dostatočne hodnoverný názor, že vplyv uhla hrotu elek-

Tab. 3. Premenné parametre pri skúškach
Tab. 3. Variable parameters at tests

Zloženie ochranného plynu / Chemical composition of shielding gas	Uhol α hrotu W elektród ($^\circ$) / Angle α of tip of W electrodes ($^\circ$)
Argón / Argon	15
Argón + 2,0 % H_2	22,5
Argón + 5,0 % H_2	30
Argón + 6,5 % H_2	45
Argón + 10 % H_2	90
Argón + 50 % H_2	180
Hélium / Helium	pologulový / hemispherical



Obr. 7. Rozmer aktívnej výšky W elektródy H (mm) vztahujúci sa na jednotkový povrch elektródy v závislosti od uhla α hrotu elektródy
Fig. 7. Size of W electrode active height H (mm) related to unit electrode surface in dependence on angle α of electrode tip
Výška na jednotkový povrch hrotu – Height related to unit tip surface, Nameraná výška pre $I = 80$ A, $h = 2$ mm – measured height for $I = 80$ A, $h = 2$ mm

tródy na geometriu zvaru pri použití malého a veľkého prúdu má rovnaký charakter.

Parametre zvarovania platní/plechov hrubých 3 mm, resp. pri doplnkových skúškach platní hrubých 2 mm a 8 mm sa stanovili overovacími skúškami. Kritériom pre voľbu parametrov zvarovania bolo dostať čo najhlbší závar bez prehĺbeného povrchu zvaru.

Skúšky sa robili v laboratóriách Linde Gáz Magyarországh Rt., Budapest. Zdrojom prúdu bol invertor ESAB Aristotic LUC 500. Stabilitu rýchlosti zvarovania zabezpečovalo špeciálne zariadenie. Uhol hrotu W elektród vytvárali brúsením v BME ATT (Technická univerzita, Budapešť). Skúšobné vzorky sa upínali v špeciálnom prípravku. Meranie napätia oblúka sa robilo multimetrom po odpojení vysokofrekvenčného zapalovania.

Metalografické skúšky sa robili v metalografickom laboratóriu BME ATT. Na delenie materiálu sa použilo plazmové rezanie, okružná píla, nožnice na plech a rezací kotúč. Po plazmovom rezaní sa mechanickým obrábaním odstránila 3 mm vrstva, plátky tenšie ako 8 mm sa zalievali do epoxidu. Vzorky sa po brúsení a leštení povrchu naleptali v roztoku $CuCl_2$, kyseliny chlorovodíkovej a alkoholu. Zo všetkých metalografických vzoriek sa zhotovili digitálne snímky, ktoré sa vyhodnocovali počítačom.

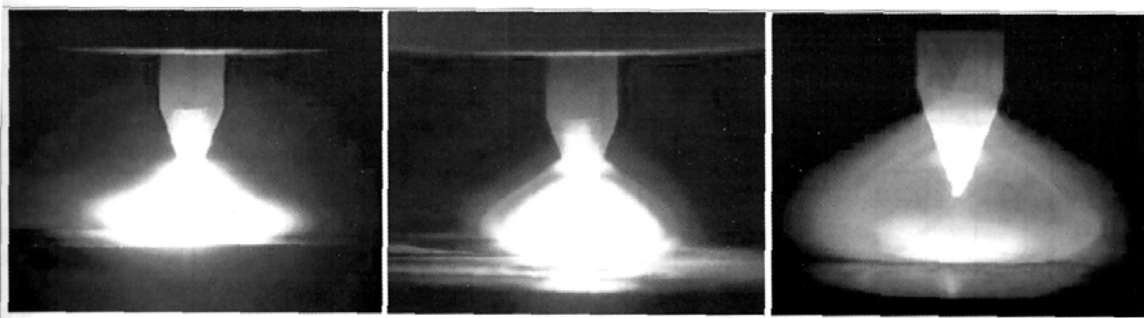
Hodnotenie výsledkov skúšok

Napätie oblúka

Závislosť napätia oblúka U_0 od uhla hrotu W elektródy α pre rôzne ochranné plyny je na obr. 4. Všetky závislosti vykazujú určitú medznú hodnotu, pri prúde 80 A je to pri hodnote α medzi $22,5^\circ$ a 30° . Tento trend len málo závisí od zloženia ochranného plynu. Prímes hélia He alebo vodíka H_2 v ochrannom plyne zvyšuje napätie oblúka. To možno vysvetliť vyšším ionizačným potenciálom primiešaných plynov a tomu zodpovedajúcemu nižšiemu podielu iónov v oblúku.

Podobné priebehy kriviek dostaneme pre rôznu intenzitu prúdu, ale pri nižšom prúde sú krivky posunuté doprava, pri vyššom prúde mierne doľava, ako je to znázornené na obr. 5 (logaritmická os x).

Táto tendencia je pochopiteľná, zmenšenie uhla hrotu



Obr. 8. Vplyv ochranného plynu na tvar stĺpca oblúka (v poradí zľava: Ar; Ar + 2 % H₂; He)

Fig. 8. Effect of shielding gas on arc column shape (in the order from the left: Ar; Ar + 2 % H₂; He)

elektrody vedie k vzrastu napätia oblúka, nakoľko na dosiahnutie danej intenzity prúdu je potrebná určitá časť emitujúceho povrchu. Zmenšovaním uhla hrotu sa časť tohto povrchu vzdalujú od zváraného materiálu. To spôsobí „kvázi“ vzrast dĺžky oblúka. Dlhší oblúk v danom rozsahu intenzity prúdu vyžaduje vyššie napätie. Pre jednotkovú intenzitu prúdu, W elektrody s uhlom hrotu α a plochou povrchu A možno vyjadriť výšku pôsobenia oblúka H (aktívna výška hrotu elektrody) vztťahom (1):

$$H = \sqrt{\frac{A}{\pi J g \frac{\alpha}{2} \left[\left(\cos \frac{\alpha}{2} \right)^{-1} + \tan \frac{\alpha}{2} \right]}} \quad (1)$$

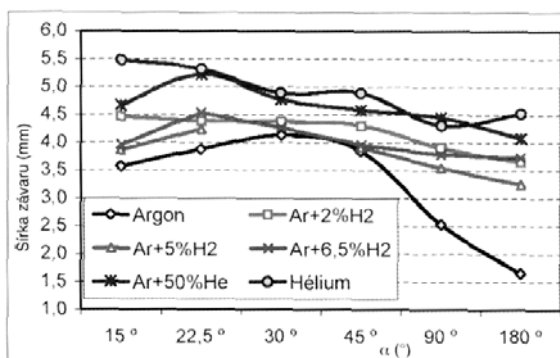
Namerané údaje sa stanovili zo vzhľadu oblúka podľa obr. 6 a sú zhrnuté na obr. 7.

Pokles napätia možno vysvetliť menším prierezom pre odvod tepla a poklesom krivosti „siločiar“ oblúka (izopotenciálu – čiary s rovnakou hodnotou teploty oblúka, resp. inej elektrickej alebo fyzikálnej charakteristiky oblúka, pri elektróde smerujú kolmo na povrch kužela hrotu elektrody, vytvárajúceho oblúk). Pri vyšších teplotách úlohu elektrických silových polí čiastočne prevezme termoemisia elektrónov. V dôsledku rastúcej teplotnej rozpínivosti elektrod emitujúce povrchy sa približujú k zváranému dielu – tým klesá dĺžka oblúka. Poklesom krivosti rastie povrchová hustota nosičov náboja a tým lokálne aj intenzita elektrického poľa. Tak na udržanie daného prúdu elektrónov stačí aj nižšie zväracie napätie.

Túto teóriu podporuje aj zistenie, že pri nižšej intenzite prúdu sa posúvajú krivky doprava. Tu totiž priemery použitých W elektrod boli podstatne menšie. Opisovaný jav je založený na členení vodičov vysokého napätia 750 kV, za účelom zmenšenia prenosových strát.

Šírka závaru

Medzi napätím oblúka a šírkou závaru je úzka súvislosť. Pri zvyšovaní napätia oblúka elektróny vystupujúce z katódy dosiahnu anódu (zváraný materiál) len po prekonaní väčšej vzdialenosti. Táto väčšia vzdialenosť zvyšuje možnosť stretávania častíc s negatívnym nábojom a neionizovanými atómami plynov. Zrážky častíc v stĺpci oblúka spôsobujú rozptýlenie stĺpca do tvaru zvonca. Tak vytvorený oblúk s pätou veľkého priemeru nataví široký pás na povrchu materiálu (obr. 8). Komponenty plynov primiešaných k argónu vplyvom ich veľkého ionizačného potenciálu tiež zväčšujú podiel neioni-



Obr. 9. Závislosť šírky závaru od veľkosti uhla α hrotu W elektrody pre rôzne druhy ochranného plynu

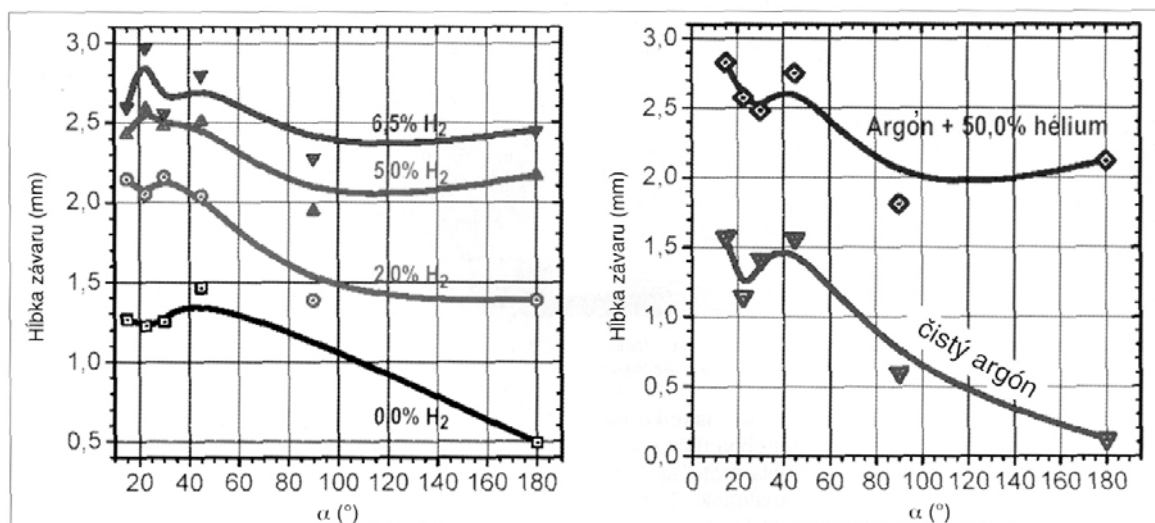
Fig. 9. Dependence of penetration width on the angle α of W electrode tip for different types of shielding gas

Šírka závaru (mm) – Penetration depth (mm)

zovaných atómov v stĺpci oblúka, preto samy výrazne prispievajú tak k rozšíreniu stĺpca oblúka, ako aj k vzrastu odporu oblúka a tým aj napätia oblúka (obr. 9).

Tab. 4. Stále – konštantné parametre a sledované parametre pri skúškach
Tab. 4. Constant parameters and studied parameters at tests

Stále parametre / Constant parameters	
Vlastnosti, rozmery a počiatočná teplota základného materiálu / Properties, dimensions and initial temperature of parent metal	
Zvärací prúd / Welding current	
Rýchlosť zvärania / Welding speed	
Prietok ochranného plynu / Shielding gas flow	
Priemer a materiál elektrody / Diameter and material of electrode	
Vzdialenosť hrotu elektrody od základného materiálu / Distance between electrode tip and parent metal	
Výlet hrotu elektrody z keramického puzdra / Stick-out of electrode tip from ceramic case	
Veľkosť otupenia/bez otupenia / Size of tapering/without tapering	
Plocha prierezu keramického puzdra pre prívod plynu / Cross-section area of ceramic case for gas supply	
Uhol sklonu pištole proti smeru zvärania / Inclination angle of gun against welding direction	
Sledované parametre / Studied parameters	
Napätie oblúka / Arc voltage	
Hĺbka závaru / Penetration depth	
Plocha prierezu závaru/roztaveného kovu / Cross-section area of penetration/molten metal	
Šírka závaru / Penetration width	
Celkový tvarový súčiniteľ ψ / Total shape factor ψ	



Obr. 10. Závislosť hĺbky závaru od uhla α hrotu W elektródy pre rôzne druhy ochranného plynu (vľavo argón + vodík, vpravo čistý argón a zmes Ar + 50 % He)

Fig. 10. Dependence of penetration depth on angle α of W electrode tip for different types of shielding gas (on the left argon + hydrogen, on the right pure argon and Ar + 50 % He mixture)

Hĺbka závaru (mm) – Penetration depth (mm), Čistý argón – Pure argon

Údaje, odlišné od očakávaných, dali len vzorky zvárané v ochrane argónu Ar. Príčinou bolo zhoršenie platní hrubých 6 mm zváraných pri opakovaných skúškach. Namerané údaje napätí taktiež vykazovali väčšie výkyvy.

Zníženie napätí možno vysvetliť zmenšením prierezu odvádzajúceho teplo a poklesom krivosti „siločiar“ vytvárajúcich oblúk. Pri vyšších teplotách úlohu elektrického silového poľa prevezme termické budenie. Vplyvom zväčšovania teplotnej rozťažnosti elektród emitujúce povrchy sa posúvajú bližšie k zváranému materiálu – tým sa skráti dĺžka oblúka. Zmenšením krivosti „siločiar“ sa zvyšuje povrchová hustota nosičov náboja a tým lokálne aj elektrické silové pole. Tak na zachovanie daného prúdu elektrónov stačí nižšie zváracie napätie.

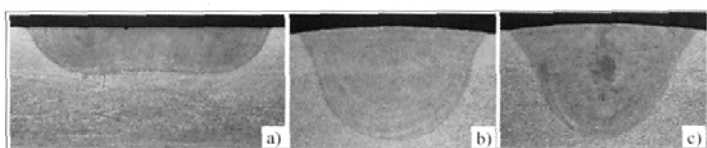
Hĺbka závaru

Pri zváraní vzoriek na skúmanie vplyvu ochranných plynov sa použila rovnaká intenzita prúdu – stanovené rozdielne hĺbky závarov vznikli vplyvom zmeny uhla hrotu elektródy a ochranných plynov. Prvoradú úlohu pri tvorbe hĺbky závaru má merné teplo ochranného plynu, ďalej jeho tepelná vodivosť a schopnosť prenosu tepla. Súhrn údajov zmeraných hĺbok závarov na metalografických výbrusoch je na obr. 10. Údaje sa vzťahujú na čistý argón (vpravo dole) a na zmes argónu s prídavkom vodíka H_2 (vľavo), resp. hélia He (vpravo hore).

Dalo sa očakávať, že pri použití zmesí plynov hĺbka závaru výrazne vzrastie. V oblasti uhlov hrotu $\alpha = 15^\circ$ až 45° sa hĺbka závaru podstatne nemení. Pri uhloch nad 45° hĺbka závaru prudko poklesne. Pri použití ochranných plynov Ar, resp. He závar sa sploští často do tvaru, ako by pozostával z dvoch paralelných húseníc – obr. 11a. Pri zvyšovaní obsahu vodíka H_2 sa sploštenie zmierňuje (obr. 11b a 11c).

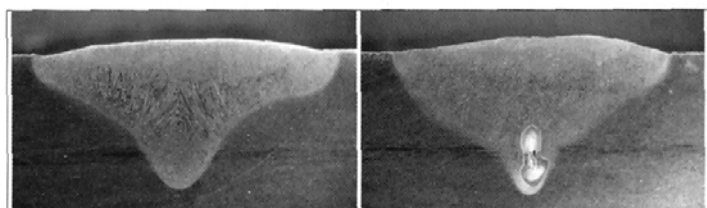
Tento jav nemožno vysvetliť len poklesom zváracieho napätia, lebo hĺbka závaru sa nezmenšila ani pri uhle 15° (a menšom napätí). Pri použití väčších zváracích prúdov možno pozorovať väčšie zmeny tvaru závaru. V rozmedzí uhlov hrotu $\alpha = 22,5^\circ$ a 30° je hĺbka závaru v osi symetrie podstatne väčšia ako bezprostredne vedľa (obr. 12).

Tvary závarov na obr. 12 sú z hľadiska tvorby spojov škodlivé, zvyšuje sa nebezpečenstvo vzniku horúcich trhlín. Pri týchto uhloch hrotu elektródy je hĺbka závaru maximálna a pri použití väčších, ako aj menších uhlov α , sa prudko



Obr. 11. Zmena tvaru závaru vplyvom rôzneho druhu ochranného plynu a) 100 % He, $\alpha = 90^\circ$, b) Ar + 5 % H_2 , $\alpha = 15^\circ$, c) Ar + 5 % H_2 , $\alpha = 180^\circ$

Fig. 11. Change of penetration shape due to the effect of different type of shielding gas a) 100 % He, $\alpha = 90^\circ$, b) Ar + 5 % H_2 , $\alpha = 15^\circ$, c) Ar + 5 % H_2 , $\alpha = 180^\circ$



Obr. 12. Tvary závaru pri použití prúdu $I = 250$ A a čistého Ar

Fig. 12. Penetration shapes with use of current $I = 250$ A and pure Ar

zmenšuje. Pri použití malých zvaracích prúdov sa nedá prakticky stanoviť vplyv uhla hrotu W elektródy na hĺbku závaru.

Plocha prierezu závaru – roztaveného kovu

Veľkosť plochy prierezu závaru úzko závisí od sledovaných dvoch parametrov: šírky a hĺbky závaru. Naproti tomu jednoduchý súčin týchto dvoch údajov poskytuje len hrubé priblíženie, lebo jednotlivé tvary závarov sa od seba výrazne líšia.

Na obr. 13 je dobre pozorovateľná tendencia, že plocha závaru pri použití W elektródy s uhlom hrotu $\alpha > 45^\circ$ výrazne klesá v dôsledku zmenšovania hĺbky závaru. Tieto závislosti sú podobné tým, ktoré sú na obr. 10, teda možno oprávnené predpokladať, že plocha závaru závisí najmä od jeho hĺbky.

Jedine pri použití prúdu $I = 250$ A nastal posun maxima plochy závaru doprava k bodu zodpovedajúcemu uhlu 45° . To je pochopiteľné, lebo práve v úzkom intervale uhlov hrotu elektródy $\alpha = 22,5^\circ$ a 30° vznikne úzka oblasť závaru, ako to ukazuje obr. 12.

Súčiniteľ celkovej geometrie závaru/húsenice

Pri posudzovaní nebezpečenstva vzniku kryštalizačných trhlín po posúdení chemického zloženia základného a prídavného materiálu, najdôležitejším činiteľom je tvar – geometria závaru. Preto tento vplyv nemožno zanedbať. Nakoľko pri zhotovovaní vzoriek zvarov sa nepoužíval prídavný materiál tvaru tyčinky alebo drôtu, preto možno použiť na vyjadrenie geometrie závaru šírky B a celkovej výšky H súčiniteľ ψ podľa vzťahu

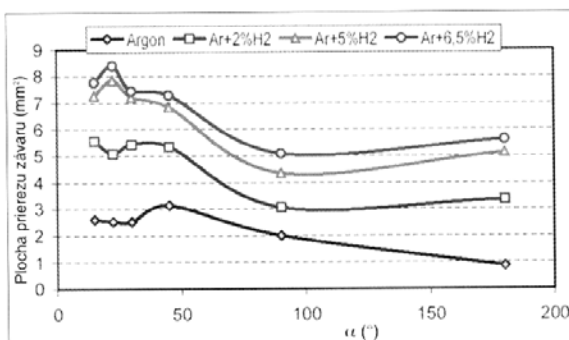
$$\psi = B/H \quad (2)$$

Ani príliš veľké ani príliš malé hodnoty súčiniteľa ψ nie sú priaznivé. Pri zvaraní spojov vysoké ψ znamená nízku efektívnosť, vysokú medzihúsenicovú teplotu a zhrubnutie zŕn a vznik škodlivých segregácií. Pri nízkej hodnote ψ vzrastá nebezpečenstvo vzniku kryštalizačných trhlín. Pri stanovení správnej hodnoty súčiniteľa ψ treba zvoliť (s ohľadom na daný materiál, technológiu a tvar konštrukcie) najmenšiu hodnotu ψ , pri ktorej možno spoľahlivo vylúčiť vznik horúcich trhlín. To však neplatí pri naváraní, tam je výhodné použiť vyššiu hodnotu ψ .

Spracovaním tu uvedených údajov možno odvodiť, že pri použití ochranného plynu Ar pre požadovanú minimálnu hodnotu ψ sú hodnoty prúdu a uhla hrotu W elektródy α tieto:

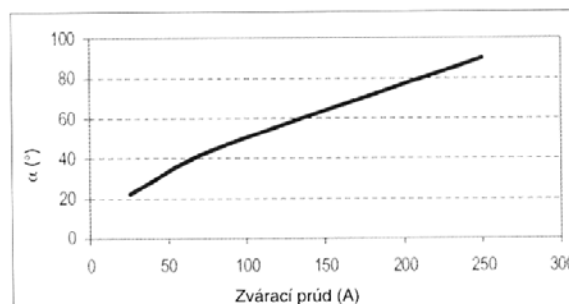
I (A)	26	80	250
α ($^\circ$)	22,5	15 a 45	15 a 90

Medziľahlé hodnoty sú väčšie ako tu uvedené. Z toho a z posúdenia tepelného zaťaženia od veľkého prúdu možno ľahko odvodiť aké sú ideálne uhly hrotu elektródy pre dané veľkosti intenzity prúdu (obr. 14). Prekročením optimálnych hodnôt sa výrazne zhorší súčiniteľ tvaru závaru. Výhodou zvarovania v zmesi plynov je, že tieto úkazy sú sotva pozorovateľné.



Obr. 13. Závislosť plochy závaru od uhla α hrotu W elektródy pre ochranné plyny s rôznym obsahom vodíka H_2

Fig. 13. Dependence of penetration area on angle α of W electrode tip for shielding gases with different hydrogen H_2 content
Plocha prierezu závaru (mm^2) – Penetration cross-section area (mm^2)



Obr. 14. Odporúčané hodnoty uhla α hrotu W elektródy v závislosti od intenzity zvaracieho prúdu (ochranný plyn Ar)

Fig. 14. Recommended values of angle α of W electrode tip in dependence on welding current intensity (Ar shielding gas)
Zvarací prúd (A) – Welding current (A)

Záver

Závody vyrábajúce priemyselné plyny poskytujú pomerne veľké množstvo údajov o vlastnostiach ochranných plynov a zmesí plynov pre zvaracích odborníkov. Aj o materiáloch W elektród poskytujú výrobcovia množstvo údajov. Pomerne málo informácií je však o vplyve tvaru hrotu elektródy na zvarovanie. To totiž nie je predmetom obchodných aktivít.

Uhol hrotu W elektródy má však významný vplyv na tvorbu tvaru závaru. Zmenou tvaru hrotu elektródy sa menia aj rozmery závaru od desať do niekoľko sto percent. Prítom stanovenie správnych parametrov zvarovania sa prejaví tak v oblasti výrobných nákladov, ako aj kvality konštrukcie. Preto je nutné, aby aj stanovenie tvaru hrotu W elektródy bolo zaradené medzi zodpovedne stanovené a optimalizované parametre zvarovania. Pri optimalizácii treba zohľadniť tieto činitele:

- súčiniteľ tvaru zvaru (vnútorný alebo celkový) a jeho minimálnu použiteľnú hodnotu pri zvarových spojoch,
- maximálnu životnosť W elektród,
- maximálnu bezpečnosť zapálenia a znovuzapaľovania oblúka,
- maximálnu produktivitu zvarovania.

Najvýhodnejšie parametre možno však stanoviť len kompromismi, lebo požiadavky sú často protichodné.

Stanovené hodnoty musia vyhovovať aj vonkajším činiteľom, ktoré pri optimalizácii vystupujú ako okrajové podmienky (napr. nebezpečenstvo vzniku kryštalizačných trhlín).

Ďalší výskum v tejto oblasti by sa mal zamerať na komplexné stanovenie vplyvu tvaru hrotu elektródy na proces zvarovania.

Tento článok mal za cieľ upozorniť na význam tejto tematickej oblasti.

Conclusions

The plants manufacturing industrial gases provide relatively large amount of data on properties of shielding gases and gas mixtures for welding specialists. The manufacturers render also many data on materials of W electrodes. However, there exists a relatively little information about the effect of electrode tip shape on welding. This is namely not the subject of business activities.

However, the angle of cone for W electrode exhibits a significant effect on penetration shape formation. With change of electrode tip shape also the penetration dimensions are changed from ten to several hundred per cent. At the same time the assessment of correct welding parameters will be proved both in the field of manufacturing costs and structure quality. Therefore it is necessary to include also the assessment of W electrode tip shape among responsibly assessed and optimised welding parameters. The following factors should be considered in optimisation:

- weld shape factor (inner or total) and its minimum value in welded joints,
- maximum service life of W electrodes,
- maximum arc ignition and reignition safety,
- maximum welding productivity.

However, the most suitable parameters can be determined only by compromises because the requirements are often contradictory. The determined values must satisfy also external factors which in optimisation act as marginal conditions (e.g. risk of solidification crack formation).

Further research in this field should be focused on complex assessment of the effect of electrode tip on welding process.

The aim of this paper was to point to the significance of this topic field.

Prispevok predniesli autori na XI. medzinárodnej zvaračskej konferencii GTE-MHTE-DVS 23. až 26. augusta 2004 v Budapešti. Je preložený a publikovaný so súhlasom autorov.

Literatúra

- [1] Baránszki-Jób, I.: Hegesztési kézikönyv (Zvaračská príručka). Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985
- [2] Bódók, K.: Az ötvöztet, gyengén ötvözött és erősen ötvözött szerkezeti acélok korrózióállósága különös tekintettel azok hegeszthetőségére (Korózna odolnosť nelegovaných, nízkolegovaných a vysokolegovaných konstrukčných ocelí s ohľadom na ich zvariteľnosť). Corweld Kft., Budapest, 1997
- [3] Gáti, J.: Hegesztési zsebkönyv (Zvaračská príručka). Cocom Mérnökiroda Kft., Miskolc, 2003
- [4] Szombatfalvy, Á.: A hőkezelés technológiája (Technológia tepelného spracovania). Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985
- [5] Tisza, M.: Metallográfia (Metalografia). Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2000
- [6] Artinger et al.: Fémek és kerámiák technológiája (Technológia kovov a keramických materiálov). Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997
- [7] Gremesberger, G. – Marti, Gy – Rejtő, Z.: Ívhegesztő áramforrások (Zdroje pre oblúkové zvarovanie). Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987
- [8] Zalesszkij, A. M.: A villamos ív (Elektrický oblúk). Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968
- [9] Kientzl, I.: A volfrámelektroda kopási folyamatának vizsgálata az AVI-hegesztéskor (Skúmanie priebehu opotrebenia volfrámovej elektródy pri TIG zvaraní). [Dizertačná práca]. BME MTAT, Budapest, 2002
- [10] <http://www.pro-fusionline.com/feedback/fc-dec99.htm>
- [11] <http://www.hodwelding.hu/technologiak.html>
- [12] <http://www.peterlutz.ch/lernen/werkstoff/metalle/nmet3k.html>
- [13] <http://www.seilnacht.tuttlingen.com/Lexikon/18Argon.htm>
- [14] http://vilib.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt_1_20.htm
- [15] Hegesztési védőgázok (Ochranné plyny na zvaranie). Linde Magyarország Rt.
- [16] Schutzgase zum Schweißen und Formieren von CrNi – Stählen. Linde Gas AG
- [17] MAG – Schweißen korrosionsbeständiger Stähle. AGA Gas GmbH & Co.
- [18] Schweißen verbindet. Schweiß- Schneid- und Schutzgase. PanGas AG
- [19] EÜM-SzCsM együttes rendelet a munkahelyek kémiai biztonságáról 25/2000 (IX. 30) (Spoločné nariadenie o bezpečnosti chemických pracovísk)



Váš dodávateľ technických plynov

www.messer.sk

Messer Tatragas, s.r.o., tel.: 02/ 502 54 111, fax.: 02/502 54 112, e-mail: info@messer.sk

MESSER 

Messer Tatragas